ISSN 2221-3937 (Онлайн)
ISSN 2221-3805 (Друк)
Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2026. № 46 (122)

УДК 621.311.243:621.311.26:629.331 DOI: https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.12

Аналіз ролі локальних відновлювальних джерел енергії та систем накопичення енергії у зменшенні пікових навантажень зарядних хабів для вантажних електромобілів

О. М. Бесараб [1], *кандидат технічних наук, професор*
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4170-8294; e-mail: besarab@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57194262142
В. Я. Деревенко [1], аспірант
ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3005-1997; e-mail: vl.de@stud.op.edu.ua
С. В. Горковський [1], *аспірант*
ORCID: http://orcid.org/0009-0003-6037-9884; e-mail: 4692120@as.op.edu.ua
А. І. Ботнар [1], *аспірант*
ORCID: http://orcid.org/0009-0004-5399-3779; e-mail: 6266441@as.op.edu.ua
[1] *Національний університет «Одеська політехніка»*

Анотація. *У статті досліджено вплив зарядних хабів вантажних електромобілів на режими роботи електроенергетичних систем, зокрема формування пікових навантажень у години максимального споживання електроенергії. Проаналізовано можливості зниження навантаження на електричну мережу шляхом інтеграції локальних відновлювальних джерел енергії, насамперед фотоелектричних установок, та систем накопичення енергії. Розглянуто технічні особливості й обмеження різних технологій накопичення енергії для використання у складі зарядної інфраструктури вантажного електротранспорту. На прикладі логістичного розподільчого центру виконано розрахунок енергетичного балансу зарядного хабу, визначено потенціал генерації сонячної електростанції із застосуванням програмного комплексу PVGIS, а також обґрунтовано параметри системи накопичення енергії для згладжування добових піків навантаження. Проведено техніко-економічну оцінку запропонованого рішення, яка підтвердила його енергетичну, економічну та екологічну доцільність для впровадження в зарядних хабах вантажних електромобілів.*

Ключові слова: *зарядний хаб, вантажний електромобіль, фотоелектрична система, система накопичення енергії, пікове навантаження, відновлювальні джерела енергії.*

Цитування статті: Бесараб О. М., Деревенко В. Я., Горковський С. В., Ботнар А. І. **(**2026**).** Аналіз ролі локальних відновлювальних джерел енергії та систем накопичення енергії у зменшенні пікових навантажень зарядних хабів для вантажних електромобілів. *Електротехнічні та комп'ютерні системи,* 46(122), с.135-146. doi:https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.12

Вступ

Збільшення кількості електромобілів, особливо вантажних, приводить до змін в комплексній структурі енергосистеми через появу пікових навантажень притаманних зарядним станціям. Враховуючи, що більшість систем електропостачання локальних рівнів не були спроектовані під цей тип роботи необхідно створити умови задля зниження пікових навантажень.

1 Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – аналіз можливостей зниження пікових навантажень зарядних хабів вантажних електромобілів.

Потрібно вирішити основні задачі:

– дослідження ефективності застосування відновлювальних джерел енергії;

– дослідження ефективності застосування систем накопичення енергії;

2 Матеріали та результати дослідження

Кожен з різних типів електричного транспорту має свій окремий "ритм" функціювання як транспортний засіб та як

© Бесараб О. М., Деревенко В. Я., Горковський С. В., Ботнар А. І., 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.uk)

споживач електричної енергії. Якщо розглядати лише електричні вантажні автомобілі (ЕВА) то необхідно звернути увагу на потужність необхідного зарядного пристрою, ємність батареї ЕВА, необхідний час зарядки, час доби та кількість зарядок за одну добу. Звичайно, неможливо спрогнозувати на рівні кожного окремого ЕВА приватного власника, але комерційні перевезення цілком можливо, враховуючи, що бізнес зацікавлений у помірному відході від транспортних засобів з бензиновими чи дизельними двигунами.

Кожна зарядна станція (окрема або комплекс об'єднаних пристроїв) може мати живлення від загальної побутової мережі (ЗПМ), відновлюваного джерела енергії (ВДЕ) як децентралізована система, так і від ВДЕ з приєднанням до ЗПМ. Негативний наслідок пікових навантажень відбувається у випадках чистої ЗПМ або ЗПМ+ВДЕ. При децентралізованій мережі живлення пікові навантаження також існують, але не мають фізичного впливу на ЗПМ окрім випадків коли нестача ВДЕ покривається за рахунок ЗПМ але з відсутністю електричних з'єднань (тобто, одна частина зарядних постів працює лише від локальної ВДЕ, а інша лише від ЗПМ). [1-3]

Цілком можна вважати, що однією з головних проблем в організації ефективної зарядної інфраструктури для ЕВА є пікова денна потужність, яка виникає, коли потрібно одночасно заряджати кілька транспортних засобів. Ця проблема є системною та не залежить від окремих технічних рішень. Вона залишається актуальною навіть за наявності ВДЕ на місці, до прикладу – фотоелектричних панелей. Основною причиною вважається асинхронність добових графіків виробництва ВДЕ та навантаження зарядних станцій, оскільки максимальне виробництво сонячної енергії припадає на світлу частину дня, але піки споживання станцій часто трапляються у ранкові або вечірні години, коли сонячна інсоляція недостатня для забезпечення необхідної потужності. Це створює принциповий дисбаланс між виробленою енергією та поточним попитом станції, який неможливо усунути без додаткових систем накопичення енергії або підключення до електромережі.

Також, фізичні та просторові обмеження накладають значні обмеження на можливість будівництва об'єктів ВДЕ. Встановлення фотоелектричних панелей на дахах ангарів та інших технічних приміщень може забезпечити лише обмежену потужність, зазвичай одиниці або десяті частки відсотка від необхідного добового споживання. Якщо розглядати вітрові турбіни, то ситуація ще більш обмежена: через нормативні вимоги щодо шуму, відстані до житлових будівель, захисних зон та ризиків для інфраструктури, їх практично неможливо встановити в міській зоні або у промислових центрах. Аналогічно, використання генераторів на паливі від біомаси або водню на місці влаштування зарядної станції пов'язане з високими капітальними витратами, складною логістикою, необхідністю транспортування палива або газу та додатковими вимогами безпеки.

Отже, роль місцевих ВДЕ обмежується лише частковим покриттям базового навантаження або системами накопичення заряду, а основним джерелом живлення залишається електроенергія з мережі. Локальні фотоелектричні панелі можуть лише зменшити пікові навантаження та сприяти частковій видачі енергії акумуляторам, проте вони не здатні гарантувати автономність станції.

Враховуючи обмежену кількість локальних ВДЕ та їх значну невідповідність графікам пікового навантаження, логічним висновком є необхідність використання систем накопичення енергії (СНЕ), які дозволяють перетворити нерівномірний потік виробництва від фотоелектричних панелей на більш стабільний та передбачуваний ресурс. Таким чином, з'явиться можливість ефективно компенсувати часову асиметрію між виробництвом та споживанням. [4,5]

На практиці СНЕ виконують кілька важливих функцій: акумулювання надлишку енергії від фотоелектричних систем протягом дня; зарядка вночі або для компенсації відсутності виробництва; зменшення пікового навантаження; гнучке управління потоками енергії.

Таким чином, СНЕ не лише компенсують недоліки локальних ВДЕ, але й дозволять бути ключовим інструментом оптимізації споживання енергії, дозволяючи ефективніше використовувати як ВДЕ на місці, так і електроенергію з мережі. Така стратегія визначає наступний крок у моделюванні та аналізі центрів навантаження: інтеграція фотоелектричних систем + енергоефективних енергетичних систем (BESS) як основного елемента для пом'якшення пікових навантажень та збільшення частки відновлюваних джерел енергії в загальному енергетичному балансі.

3 Оптимізація використання ВДЕ та СНЕ в зарядних центрах

За умов обмеженої потужності місцевих ВДЕ та значної мінливості добових графіків споживання ЕВА оптимізація енергетичного балансу центру передбачає: комбіноване викори

стання сонячних панелей, СНЕ та електроенергії ЗПМ. Ця стратегія дозволяє максимально ефективно використовувати доступну «чисту» енергію, зменшуючи пікові навантаження на мережу та економічно оптимізувати витрати на постачання електроенергії. [6]

У запропонованій схемі удень використовується енергія з локальної ВДЕ та закуплена потужність «зеленої» електроенергії з ринку (ВДЕ). Це буде гарантувати, що основна частина добового навантаження зарядного центру покриється найбільш екологічно чистим ресурсом, та дозволить накопичити надлишок енергії до СНЕ. Збережена енергія буде використовуватися задля компенсації короткочасного пікового попиту або у випадках тимчасової відсутності виробництва локальної ВДЕ. Вночі або в періоди низького виробництва СНЕ можуть заряджатися від мережі за нічними тарифами, ці тарифи, зазвичай, характеризуються зниженими цінами, водночас діючи як буфер для майбутніх пікових навантажень. Хоча нічна енергія, зазвичай, отримується з традиційних джерел (атомних, газових, вугільних та ін.), проте її використання дозволяє ефективно керувати загальним балансом зарядного комплексу, а саме знизити витрати та підтримати стабільну роботу зарядних станцій. Запропонована концепція передбачає комбіноване покриття попиту, де: локальні фотоелектричні системи максимально задовольняють денні потреби; СНЕ накопичують надлишок та дешеву нічну електроенергію для компенсації дефіциту та піків споживання; мережа забезпечує гарантоване покриття необхідної потужності в години пікового споживання. Такий підхід дозволить поєднати екологічну ефективність та економічну доцільність, одночасно зменшуючи навантаження та підвищуючи надійність зарядної інфраструктури.

На сучасному технологічному етапі запропоновано різні технологічні підходи до СНЕ. Конструктивно вони виконані з: електрохімічних батарей, суперконденсаторів, механічних систем накопичення (інерційні маховики, гравітаційні акумулятори) та проточних батарей. Кожна з цих технологій має свої переваги та обмеження щодо щільності енергії, питомої потужності, вартості, складності експлуатації та придатності для встановлення в обмежених просторах, що характерно для більшості зарядних центрів та об'єктів транспортної інфраструктури.

Наведемо стислий огляд кожного технічного рішення щодо СНЕ. [7]

Літій-іонні накопичувачі (електрохімічні батареї) одночасно забезпечують функцію згладжування пікового навантаження та функцію енергетичного буфера для нерівномірного виробництва відновлюваної енергії, також надають можливість оптимізації споживання електроенергії за інтервальними тарифами. Їхня компактність, модульність та широка доступність промислових рішень роблять їх основним компонентом сучасних потужних зарядних станцій. [8,9]

Суперконденсатори характеризуються надзвичайно високою питомою потужністю та великою кількістю циклів, завдяки чому вони ефективні у випадках, коли потрібна миттєва компенсація короткоімпульсних навантажень, але їхня щільність енергії в десятки разів нижча, ніж у літій-іонних акумуляторів. Це означає, що для забезпечення навіть кількох хвилин автономної роботи зарядного комплексу знадобилася б непропорційно велика кількість модулів суперконденсаторів, що практично неможливо в реальних умовах та з обмеженнями капітальних витрат. [10]

Механічні системи накопичення енергії, такі як маховики, хоча й забезпечують високу ефективність та швидку реакцію, вимагають значного простору, складних фундаментних конструкцій та вищих вимог до безпеки. [11]

Проточні акумулятори мають тривалий термін служби та можливість масштабування ємності зберігання, але є занадто громіздкими для використання в зонах автотранспортних підприємств (АТП), логістичних центрах або на автозаправних станціях, де компактність та легкість інтеграції є критичними параметрами. [12]

Таким чином, незважаючи на широкий спектр доступних технологій СНЕ, їх практичне застосування для завдань інтеграції у складі ВДЕ в зарядну інфраструктуру ЕВА суттєво обмежене комплексом технічних, економічних та просторових факторів. З огляду на це, найбільш технологічно та економічно доцільним рішенням є електрохімічне накопичення енергії на основі літій-іонних акумуляторів, які поєднують високу щільність енергії, стабільну роботу, тривалий термін служби та можливість швидкого енергопостачання та довготривалого зберігання енергії.

4 Практична складова аналізу

Маючи теоретичні напрацювання перевіримо можливості практичної реалізації. Також візьмемо до уваги інформацію з [13].Враховуючи, що вантажні перевезення складають для багатьох підприємств комерційну таємницю доволі важко знайти відкриті актуальні данні в цілому в галузі. Також приймемо факт того, що на даний час в

Україні майже всі великотоннажні автомобілі ще дизельні або бензинові, тому даний матеріал водночас слугує розробкою шляхів переведення автопарків на ЕВА. За доступною інформацією одного з підприємств в якому наявний власний автомобільний парк [14] отримаємо кількість вантажівок: 159 тягача марки Mercedes, 5 тягачів марки Scania, 121 шасі марки Scania, 36 малотоннажних авто марки Mercedes-Benz Sprinter. Загальний пробіг всіх автомобілів за рік становить 37 927 тис. км. Спробуємо підібрати повністю електричний парк автівок та навести його у таблиці 1 з вказанням технічних даних зарядних станцій та розподілу ЕВА.

У 2026 році виробники можуть запропонувати такі вантажівки з наступними параметрами як:

1. Mercedes-Benz eActros 600. Запас ходу до 500 км, під час пауз можлива підзарядка, що сумарно дає запас ходу до 1000 км. Вантажопід'-єм-ність 22 тони, зарядний пристрій на 400 кВт; [15]

2. Scania BEV Запас ходу до 500 км. Зарядна станція 375 кВт.; [16]

3. Mercedes eSprinter — Chassis-Cab Запас ходу 300-400 км. Зарядна станція 115 кВт. [17]

Якщо слідувати рекомендаціям щодо режимів роботи, а саме у нічний час доби рух тягачів і зарядка шасі та малотоннажних машин, а вдень навпаки, визначимо приблизну максимальну потужність необхідну для зарядки. Приймаючи до відома рекомендації заводів-виробників враховуємо, що кожну машину заряджаємо від 20% до 80%. Враховуючи, що в мережі є 5 розподільчих центрів та 312 супермаркетів доцільно буде виконувати зарядку під час вантажних операцій у розподільчих центрах. Припускаючи, що вони розташовані таким чином щоб мати приблизно однаковий вантажопотік, кількість транспорту за добу буде приблизно однакова. У таблиці 1 наведено дані щодо прогнозованої потужності, яка необхідна на добу для зарядки ЕВА, що заряджаються з неї.

Таблиця 1 – Відомості щодо характеристик зарядної станції та кількості електромобілів

Модель	Потужність станції, кВт	Ємність батареї, кВт*год	Час зарядки до 80%, хв.	Кількість машин загальна, од.	Кількість машин одного центру, од.
Mercedes eActros	400	621	60-70	164	33
Scania BEV	375	560	50-60	121	25
Mercedes eSprinter	115	113	40-45	36	8

Наступним кроком, з відкритих картографічних джерел [18] отримаємо вихідні данні щодо місця розташування розподільчого центру в Одеській області. Виконуємо розрахунок площі, яку теоретично можливо використати під встановлення фотоелектричних панелей. Маючи довжину 140 метрів та ширину 116 метрів отримаємо площу у 16240 м². Параметри фотоелектричних панелей потужністю 500 Вт залишаємо незмінними з [13], таким чином загальна потужність станції складатиме, з заокругленням у меншу сторону, 3 МВт. Використовуючи відомий ресурс PVGIS [19] виконано розрахунки щодо отримання можливої місячної кількості енергії від фотоелектричних панелей, результати зведено до таблиці 2.

Таблиця 2 – Показники виробленої електроенергії від фотоелектричних панелей

Місяць	Кількість енергії, кВт*год за місяць	Кількість енергії, кВт·год за день, середнє значення
Січень	142372	4593
Лютий	191185	6828
Березень	323763	10444
Квітень	386311	12877
Травень	437778	14122
Червень	433527	14451
Липень	458757	14799
Серпень	456503	14726
Вересень	383612	12787
Жовтень	296673	9570
Листопад	158379	5279
Грудень	122327	3946

Складемо таблицю 3 з плануванням щодо залежності часу доби та типів і кількості ВЕА, які треба зарядити. Приймемо, що добу умовно розіб'ємо на дві рівнічастини по 12 годин. Виходячи з технічних умов, зарядка Mercedes eActros проводиться з 8 ранку до 20 вечора. За 12 годин необхідно зарядити 33 машини по 70 хв. Мінімальна кількість зарядних постів із врахуванням резерву – 4 шт. Під час та після заряду машин зайва енергія може бути направлена у ЗПМ чи накопичувачі енергії.

На заряд Scania BEV та Mercedes eSprinter також відводиться 12 годин. Розглянемо максимальний варіант за часом заряду кожного типу таким чином: на 25 машин Scania BEV необхідно витратити 1500 хв., на 8 Mercedes eSprinter 360 хв. Кількість зарядних постів із врахуванням резерву для Scania BEV – 3 шт, для Mercedes eSprinter – 2 шт. Оскільки з 20 години до 8 ранку рівень інсоляції в різні періоди року різний від мінімального до її відсутності дані типи автомобілів заряджаємо тільки від мережі та накопичувача енергії.

Необхідна максимальна миттєва потужність: Mercedes eActros 4 од. за цикл – 1600 кВт; Scania BEV 3 од. за цикл – 1125 кВт; для заряду Mercedes eSprinter за умови заряду по 2 од. за цикл – 330 кВт.

Сумарне добове споживання з урахуванням заряду в рекомендованих межах від 20 до 80%: Mercedes eActros 33 × 373 = 12309 кВт·год; Scania BEV: 25 × 336 = 8400 кВт·год; Mercedes eSprinter: 8 × 68 = 544 кВт·год. Разом: 21253 кВт·год.

Таблиця 3 – Рекомендований режим роботи зарядних станцій розподільчого центру

Модель	Кількість машин одного центру, од.	Потужність станції, кВт	Кількість зарядних станцій	Загальна потужність зарядних станцій, кВт	Загальний час заряджання, хв	Енергія на заряджання, кВт·год	Оптимальний час доби, год
Mercedes eActros	33	400	4	1600	2310	12309	з 08:00 до 20:00
Scania BEV	25	375	3	1125	1500	8400	з 20:00 до 08:00
Mercedes eSprinter	8	115	2	330	360	544	

Аналіз результатів розрахунків показує, що навіть влітку фотоелектричні панелі розподільчого центру не можуть покрити добову потребу в енергії. Отже, підприємству необхідно отримувати з ЗПМ недостатню електроенергію, добова кількість вказана в таблиці 4.

Згідно з таблицею 4 у різні місяці є дефіцит, який необхідно покрити за рахунок зовнішньої енергії. Для правильності вибору режимів роботи необхідно звернутися до добових графіків виробництва/споживання електроенергії.

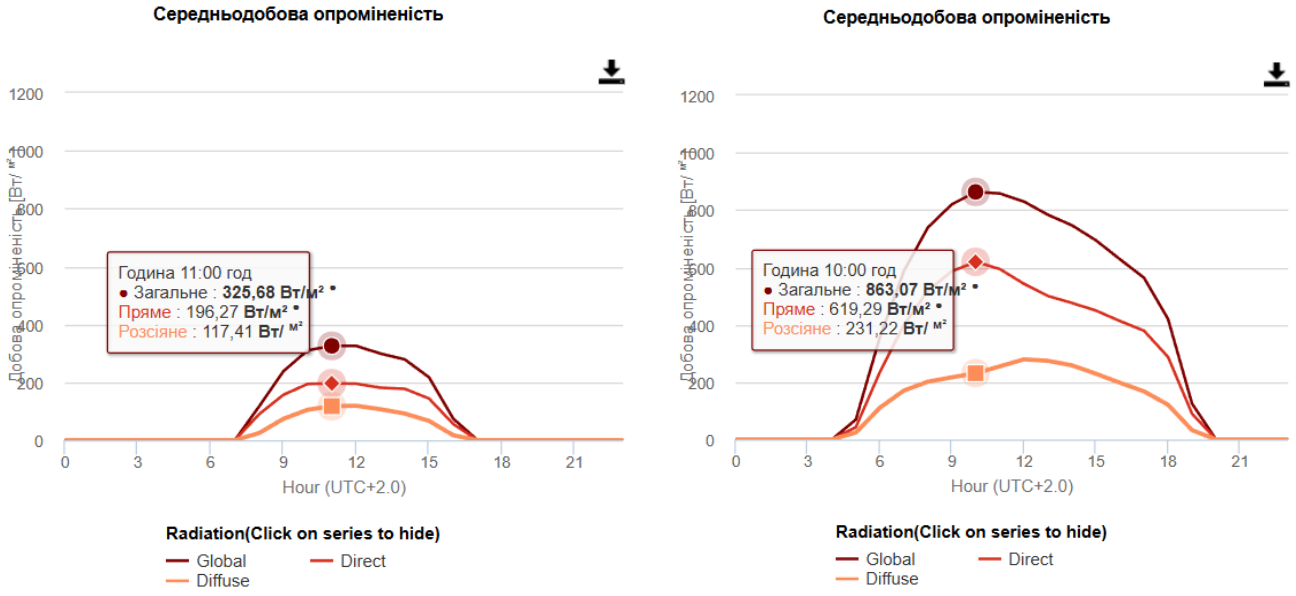
Таблиця 4 – Відомості щодо небалансів електричної енергії, які потрібно компенсувати

Місяць	Кількість енергії кВт·год за місяць	Кількість енергії кВт·год за день, середнє значення	Середнє значення нестачі, що споживається з ЗПМ за добу, кВт·год
Січень	142372	4593	16660
Лютий	191185	6828	14425
Березень	323763	10444	10809
Квітень	386311	12877	8376
Травень	437778	14122	7131
Червень	433527	14451	6802
Липень	458757	14799	6454
Серпень	456503	14726	6527
Вересень	383612	12787	8466
Жовтень	296673	9570	11683
Листопад	158379	5279	15974
Грудень	122327	3946	17307

Такі графіки дають інформацію щодо піків та провалів навантаження по годинам протягом доби. Цілю роботи є спроба представити механізми згладжування навантажень. Пропонується під час пікових навантажень використовувати лише енергію від ВДЕ та у комплексі ВДЕ+СНЕ і виключити/мінімізувати отримання її з ЗПМ. В години провалів навантаження використовувати енергію з ЗПМ для безпосередньо зарядних станцій та для заряджання СНЕ. Через діючий на момент написання статті правовий режим військового стану на території України, відсутня можливість отримати актуальні добові графіки тому використовуємо архівну інформацію з публічного доступу [20].

Отже, інформація з графіку [20] показує, що провал у споживанні наявний вночі з 00 до 04 години. Пікові навантаження з 10 до 18 години. Режим роботи ВДЕ під час піку досягає своїх технічних можливостей, а в провалі ВДЕ має низьку, майже нульову генерацію.

На рис. 1 подано теоретично можливий графік з програми [19] добової генерації взимку (січень) та влітку (липень).



а) б)

Рис. 1 – Добова інсоляція: а – взимку; б - влітку

Як відомо, більшість фотоелектричних панелей здатні прийняти не більше 200-230 Вт·м2 енергії. Згідно отриманої інформації під час світлої пори доби інсоляція перевищує технічні можливості, що свідчить про роботу ВДЕ на максимальній потужності. Отже, взимку максимальна генерація можлива у період часу з 8 до 16, влітку з 5 до 20 години. Також при розряджанні СНЕ в темний час доби виконується наступний цикл зарядки вже від ЗПМ в години найменшого споживання енергії іншими споживачами, тобто з 00 до 04 години.

На останньому етапі залишається виконати вибір необхідного СНЕ та виконати економічну оцінку. На даний час оптимальною ринковою пропозицією за потужністю СНЕ є модель HITHIUM Energy Storage System Container Block потужністю 2500 кВт та ємністю модулю 10032 кВт·год [21].

Виходячи з кількості одержуваної енергії від СЕС і необхідності в зарядці у світлий час доби автомобілів типу Mercedes eActros з розрахунковим споживанням 12309 кВт·год випливає, що з березня по вересень надлишок генерації прямує в накопичувач. Нестача з останнього стовпчика таблиці покривається виключно енергією від ЗПМ. Оскільки комерційні підприємства мають різні способи закупівлі енергії, необхідно визначитися з оптимальним варіантом, враховуючи умову зниження пікових навантажень у загальній мережі. Таким чином, звертаємось до добового графіка споживання та генерації. Виходячи з поданої інформації найменше навантаження з 00:00 до 06:00. Так само спостерігається два піки з 07 до 11 години та з 17 до 21 години. Робочий режим зарядної станції змушений споживати електроенергію у ранковий пік, а також у вечірній пік до моменту зниження навантаження. Пропонується розглянути можливість роботи у вечірні години-пік з березня по вересень за рахунок накопиченої енергії від СЕС, а ранкові години-пік покривати накопиченою енергією від мережі, отриманої в момент мінімального навантаження енергосистеми. З жовтня по березень че-

рез недостатню інсоляцію неможливо накопичити енергію від СЕС, таким чином накопичувач повинен мати достатню ємність для перекриття вечірнього піку в повному або частковому обсязі. Раціонально запропонувати під час вечірнього піку два варіанти роботи станції: спочатку зарядка всіх Mercedes eSprinter, потім Scania BEV або в пропорції 50/50. Далі визначаємо мінімальну ємність накопичувача, яка дорівнюватиме різниці найбільшої генерації СЕС за рік і споживанню для циклу заряду з 8 ч. до 20 ч., що відповідає 2490 кВт·год, а максимальна ємність має перевищувати найбільшу річну різницю, яку необхідно покрити від загальної мережі – 17307 кВт·год. Тому передбачається можливість встановлення двох готових модулів.

Для розрахунку економічних потенціалів розглянемо показники ринку на добу вперед (РДН) (табл. 5) протягом 2025 року. [22] З яких випливає, що в сезон активної сонячної інсоляції вартість у піковий годинник нижча, ніж при позапікових, у місяці з мінімальною сонячною інсоляцією вартість має протилежний сенс. З чого випливає, що в об'єднаній системі з березня по вересень у години пік спостерігається періоди профіциту генерації, які так само негативно впливають на роботу та стійкість системи. Тому в ці місяці пропонується здійснювати максимально можливий заряд накопичувачів саме в години активної інсоляції, а з жовтня до лютого у позапіковий час.

Таблиця 5 – Відомості щодо основник показників РДН за 2025 рік [22]

	01-2025	02-2025	03-2025	04-2025	05-2025	06-2025	07-2025	08-2025	09-2025	10-2025	11-2025	12-2025	Рік
Індекс база (ОЕС), грн/МВт·год	5 548,03	5 872,87	5 150,78	4 258,63	4 421,95	4 664,67	5 184,24	5 188,79	4 196,92	5 987,71	6 387,89	6 648,95	5 292,40
Індекс пік (ОЕС), грн/МВт·год	6 189,23	6 100,22	4 879,12	3 495,92	3 543,87	3 062,06	4 152,29	3 641,24	3 510,63	6 167,02	7 406,62	7 410,98	4 960,44
Індекс позапік (ОЕС), грн/МВт·год	4 906,84	5 645,52	5 422,71	5 021,35	5 300,03	6 267,28	6 216,19	6 736,33	4 883,22	5 807,38	5 369,15	5 886,91	5 624,31
Середньозважена ціна на РДН, грн/МВт·год	5 817,56	6 042,08	5 473,83	4 611,22	4 638,31	4 783,04	5 247,40	5 420,05	4 521,85	6 395,70	6 830,49	6 880,55	5 643,94
Обсяг купівлі-продажу на РДН, МВт·год	2 636 439,9	2 985 738,5	2 438 816,7	2 202 620,7	2 292 292,5	2 516 562,4	2 826 811,8	2 425 749,0	1 987 009,9	2 829 955,0	2 815 165,4	3 186 766,7	31 143 928,5
Середньодобовий обсяг торгів на РДН, МВт·год	85 046,4	106 633,5	78 671,5	73 420,7	73 944,9	83 885,4	91 187,5	78 250,0	66 233,7	91 288,9	93 838,8	102 798,9	85 325,8

Виконаємо орієнтовний економічний розрахунок, для початку припустимо, що на території розподільного центру повністю відсутні сонячні панелі та засоби накопичення енергії. Річне споживання електроенергії зарядними постами складе 7757345 кВт·год, приймаючи вартість електроенергії як середньозважену річну [22], у грошовому еквіваленті відповідно 56,085 млн. грн. За наявності СЕС та засобів накопичення необхідно придбати 3966141 кВт·год електроенергії на суму 18 100 423 грн. Таким чином, за рік економія за рік становить 3 791 187 кВт·год та 28,675 млн. грн. Враховуємо витрати на встановлення системи СЕС. Приймаємо, що орієнтовно вартість 1 кВт складає 1500 доларів [23], за курсу 1 до 44 та потужності СЕС у 3000 кВт отримуємо 198 млн грн. Вартість СНЕ з двох модулів складає 85,1 млн. грн. Отже, підсумкові витрати становлять 283 млн. грн. Таким чином, покриття витрат на систему окупиться через 283/28,7=9,9 років, що є прийнятним.

Висновки

Розповсюдження локальних зарядних хабів у зонах активного транспортного руху потребують комплексних рішень щодо впровадження заходів з зниження пікових навантажень на електричні мережі. Запропоноване вирішення проблеми з встановленням СНЕ та фотоелектричних панелей згідно розрахунків має раціональне, економічне, екологічне та енергоощадне рішення.

Добовий цикл роботи зарядної станції на підприємстві передбачає, що за наявності надлишків енергії від ВДЕ вони поступатимуть до СНЕ та будуть використані під час відсутності генерації ВДЕ за умови, що ЗПМ матиме пікові навантаження. Також алгоритм роботи СНЕ передбачає після розрядки у вечерні години пікового навантаження виконати цикл зарядки з ЗПМ в нічний час доби під час мінімального споживання електроенергії системою задля компенсації нестачі потужності у ранковий пік навантаження

до моменту введення ВДЕ у роботу, протягом світлового дня зайва енергія з ВДЕ спрямовується на зарядку СНЕ, для роботи у вечірні пікові годи після зниження генерації ВДЕ, що в цілому дозволяє зменшити залежність від централізованого електропостачання та знизити навантаження на енергосистему у пікові години.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів стосовно поточного дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські чи будь-які інші, які могли б вплинути на дослідження, а також на результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Усі дані доступні, як у числовій, так і в графічній формі, в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту

Автори заявляють про використання інструменту штучного інтелекту: ChatGPT model (OpenAI GPT-5, версія 2025), номер 5.0.1. Інструмент штучного інтелекту використовувався для аналізу літературних даних та пошуку інформації. Результати, надані інструментом штучного інтелекту, були перевірені шляхом ручного тестування на реальних текстах наукових публікацій авторів.

Внесок авторів

Бесараб О. М.: наукове керівництво, розробка методології, загальне адміністрування, редагування текстів;
Деревенко В. Я.: дослідження, інтерпретація результатів, написання початкової версії тексту;
Горковський С. В.: обробка даних, візуалізація матеріалу, формування та редакція загальних висновків;
Ботнар А. І.: формування та оформлення списку літератури і анотацій.

Список використаної літератури

1. Khan, S. U.-D., Wazeer, I., Almutairi, Z., & Alanazi, M. (2022). Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system. Alexandria Engineering Journal, 61(9), 6739–6753. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.025.

2. Yang, D., Lv, Y., Ji, M., & Zhao, F. (2024). Evaluation and economic analysis of battery energy storage in smart grids with wind–photovoltaic. International Journal of Low-Carbon Technologies, 19, 18–23. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad142.

3. Hossain, M. N., & Cho, H. M. (2026). Techno-economic feasibility of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations: A global review and future outlook. Sustainable Energy Research, 13, 9. https://doi.org/10.1186/s40807-025-00228-1.

4. Singh, S., Alharthi, M., Anand, A., et al. (2022). Performance evaluation and financial viability analysis of grid associated 10 MWP solar photovoltaic power plant at UP India. Scientific Reports, 12, 22380. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26817-4.

5. Hai, T., Jaffar, H. A., Taher, H. H., Al-Rubaye, A. H., Said, E. A., Abdul Hussein, A. H., Alhaidry, W. A. L. H., Idan, A. H., & Salehi, A. (2024). Techno-economic and environmental analysis of a grid-connected rooftop solar photovoltaic system in three climate zones. International Journal of Low-Carbon Technologies, 19, 1725–1739. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae123.

6. Do, L. T., Nguyen, T. N., Tran, Q. T., & Duong, K. T. (2025). Economic analysis of solar power plant and battery energy storage: Case study of Binh Phuoc province, Vietnam. Cleaner Engineering and Technology, 26, 100937. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100937.

7. Деревенко В.Я. (2025). Аналіз технологій накопичення та зберігання енергії, виробленої з відновлювальних джерел, для інтеграції у комплекси зарядних станцій вантажних електромобілів. Collection of Scientific Papers with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes» (December 15-17, 2025, Zurich, Switzerland). European Open Science Space, 379-383. Доступно за адресою: https://www.eoss-conf.com/en/archive/evolving-science-theories-discoveries-and-practical-outcomes-15-12-25/ [Доступ отримано: 26 січня 2026].

8. Attia, P. M., et al. (2022). Review—"Knees" in lithium-ion battery aging trajectories. Journal of The Electrochemical Society. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6d13.

9. Vistra Corp. (2023). Vistra Completes Milestone Expansion of Flagship California Energy Storage System. Доступно за адресою: https://investor.vistracorp.com/2023-08-01-Vistra-Completes-Milestone-Expansion-of-Flagship-California-Energy-Storage-System [Доступ отримано: 02 лютого 2026].

10. Dissanayake, K., & Kularatna-Abeywardana, D. (2024). A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications. Journal of Energy Storage. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112563.

11. Ecotechnica. (2024). Перший комерційний гравітаційний накопичувач енергії запущено в експлуатацію в Китаї. Доступно за адресою: https://ecotechnica.com.ua/uk/technology/pervyj-kommercheskij-gravitatsionnyj-nakopitel-energii-zapushchen-v-ekspluatatsiyu-v-kitae [Доступ отримано: 15 січня 2026].

12. Purtill, J. (2023). Vanadium redox flow batteries can provide cheap, large-scale grid energy storage: Here's how they work. Доступно за адресою: https://www.abc.net.au/news/science/2023-02-02/vanadium-redox-flow-battery-and-future-of-grid-energy-storage/101911604 [Доступ отримано: 05 лютого 2026].

13. Бесараб О. М., Деревенко В. Я., Горковський С. В. (2025). Оцінка можливостей заряджання вантажних електричних автомобілів від фотоелектричних панелей. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. № 42(118). С. 71–77. Київ : Техніка. doi: https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025.8.

14. Кононцева В. (2023). Розробка логістичної стратегії підприємства ТОВ «Сільпо-Фуд» в умовах мінливого середовища. Доступно за адресою: https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6c99d832-c148-40fb-80f5-b4e06755538b/content [Доступ отримано: 07 лютого 2026].

15. Технічна інформація Mercedes-Benz eActros 600. (2026). Доступно за адресою: https://www.mercedes-benz-trucks.com/int/en/trucks/eactros.html#comparison-eactros-types [Доступ отримано: 07 лютого 2026].

16. Технічна інформація Scania BEV. (2026). Доступно за адресою: https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html [Доступ отримано: 07 лютого 2026].

17. Технічна інформація Mercedes eSprinter. (2026). Доступно за адресою: https://www.mercedes-benz.ua/vans/van-models/esprinter-panel-van-fl-805/ [Доступ отримано: 07 лютого 2026].

18. OpenStreetMap. (2026). Доступно за адресою: https://www.openstreetmap.org/ [Доступ отримано: 09 лютого 2026].

19. Photovoltaic Geographical Information System. (2026). Доступно за адресою: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [Доступ отримано: 17 лютого 2026].

20. В Україні рекордне споживання електроенергії за шість років. (2021). Доступно за адресою: https://news.finance.ua/ua/news/-/487230/v-ukrayini-rekordne-spozhyvannya-elektroenergiyi-za-shist-rokiv [Доступ отримано: 11 лютого 2026].

21. Установка зберігання енергії (УЗЕ) потужністю 2 500 кВт та ємністю АКБ 10 032 кВт*год. (2026). Доступно за адресою: https://www.solargarden.com.ua/obladnannya/ustanovka-zberihannya-enerhii-uze-hithium-block-2-500-kvt-10-032-kvt-hod/ [Доступ отримано: 02 березня 2026].

22. Звіт щодо спостереження за роботою ринку «надобу наперед» та внутрішньодобового ринку за 2025 рік. (2025). Доступно за адресою: https://www.oree.com.ua/index.php/web/11563?lang=english [Доступ отримано: 05 березня 2026].

23. Top 10 Facts Every Industrial Leader Must Know About Solar Panel Cost in 2025. (2025). Доступно за адресою: https://soleosenergy.com/10-facts-solar-panel-cost-industrial-leaders/ [Доступ отримано: 05 березня 2026].

References

1. Khan, S. U.-D., Wazeer, I., Almutairi, Z., & Alanazi, M. (2022). Techno-economic analysis of solar photovoltaic powered electrical energy storage (EES) system. Alexandria Engineering Journal, 61(9), 6739–6753. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.12.025.

2. Yang, D., Lv, Y., Ji, M., & Zhao, F. (2024). Evaluation and economic analysis of battery energy storage in smart grids with wind–photovoltaic. International Journal of Low-Carbon Technologies, 19, 18–23. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctad142.

3. Hossain, M. N., & Cho, H. M. (2026). Techno-economic feasibility of photovoltaic-powered electric vehicle charging stations: A global review and future outlook. Sustainable Energy Research, 13, 9. https://doi.org/10.1186/s40807-025-00228-1.

4. Singh, S., Alharthi, M., Anand, A., et al. (2022). Performance evaluation and financial viability analysis of grid associated 10 MWP solar photovoltaic power plant at UP India. Scientific Reports, 12, 22380. https://doi.org/10.1038/s41598-022-26817-4.

5. Hai, T., Jaffar, H. A., Taher, H. H., Al-Rubaye, A. H., Said, E. A., Abdul Hussein, A. H., Alhaidry, W. A. L. H., Idan, A. H., & Salehi, A. (2024). Techno-economic and environmental analysis of a grid-connected rooftop solar photovoltaic system in three climate zones. International Journal of Low-Carbon Technologies, 19, 1725–1739. https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae123.

6. Do, L. T., Nguyen, T. N., Tran, Q. T., & Duong, K. T. (2025). Economic analysis of solar power plant and battery energy storage: Case study of Binh Phuoc province, Vietnam. Cleaner Engineering and Technology, 26, 100937. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100937.

7. Derevenko, V. Ya. (2025). Analiz tekhnolohii nakopychennia ta zberihannia enerhii, vyroblenoi z vidnovliuvalnykh dzherel, dlia intehratsii u kompleksy zariadnykh stantsii vantazhnykh elektromobiliv. In Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference "Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes", 379–383. Zurich: European Open Science Space. Available at: https://www.eoss-conf.com/en/archive/evolving-science-theories-discoveries-and-practical-outcomes-15-12-25/ [Accessed 26 Jan 2026].

8. Attia, P. M., et al. (2022). Review—"Knees" in lithium-ion battery aging trajectories. Journal of The Electrochemical Society. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ac6d13.

9. Vistra Corp. (2023). Vistra Completes Milestone Expansion of Flagship California Energy Storage System. Available at: https://investor.vistracorp.com/2023-08-01-Vistra-Completes-Milestone-Expansion-of-Flagship-California-Energy-Storage-System [Accessed 02 Feb 2026].

10. Dissanayake, K., & Kularatna-Abeywardana, D. (2024). A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications. Journal of Energy Storage. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112563.

11. Ecotechnica. (2024). Pershyi komertsiinyi hravitatsiinyi nakopychuvach enerhii zapushcheno v ekspluatatsiiu v Kytai. Available at: https://ecotechnica.com.ua/uk/technology/pervyj-kommercheskij-gravitatsionnyj-nakopitel-energii-zapushchen-v-ekspluatatsiyu-v-kitae [Accessed 15 Jan 2026].

12. James Purtill. (2023). Vanadium redox flow batteries can provide cheap, large-scale grid energy storage. Here's how they work. Available at: https://www.abc.net.au/news/science/2023-02-02/vanadium-redox-flow-battery-and-future-of-grid-energy-storage/101911604 [Accessed 05 Feb 2026].

13. Besarab, O. M., Derevenko, V. Ya., & Horkovskyi, S. V. (2025). Otsinka mozhlyvostei zariadzhannia vantazhnykh elektrychnykh avtomobiliv vid fotoelektrychnykh panelei. Elektrotekhnichni ta Kompiuterni Systemy, (42(118)), 71–77. Kyiv: Tekhnika. https://doi.org/10.15276/eltecs.42.118.2025.8.

14. Konontseva, V. (2023). Rozrobka lohistychnoi stratehii pidpryiemstva TOV "Silpo-Fud" v umovakh minlyvoho seredovyshcha. Available at: https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6c99d832-c148-40fb-80f5-b4e06755538b/content [Accessed 07 Feb 2026].

15. Technical information Mercedes-Benz eActros 600. (2026). Available at: https://www.mercedes-benz-trucks.com/int/en/trucks/eactros.html#comparison-eactros-types [Accessed 07 Feb 2026].

16. Technical information Scania BEV. (2026). Available at: https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html [Accessed 07 Feb 2026].

17. Technical information Mercedes eSprinter. (2026). Available at: https://www.mercedes-benz.ua/vans/van-models/esprinter-panel-van-fl-805/ [Accessed 07 Feb 2026].

18. OpenStreetMap. (2026). Available at: https://www.openstreetmap.org/ [Accessed 09 Feb 2026].

19. Photovoltaic Geographical Information System. (2026). Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [Accessed 17 Feb 2026].

20. V Ukraini rekordne spozhyvannia elektroenerhii za shist rokiv. (2021). Available at: https://news.finance.ua/ua/news/-/487230/v-ukrayini-rekordne-spozhyvannya-elektroenergiyi-za-shist-rokiv [Accessed 11 Feb 2026].

21. Ustanovka zberihannia enerhii (UZE) potuzhnistiu 2500 kW ta yemnistiu AKB 10032 kWh. (2026). Available at: https://www.solargarden.com.ua/obladnannya/ustanovka-zberihannya-enerhii-uze-hithium-block-2-500-kvt-10-032-kvt-hod/ [Accessed 02 Mar 2026].

22. Zvit shchodo sposterezhennia za robotoiu rynku "na dobu napered" ta vnutrishnodobovoho rynku za 2025 rik. (2025). Available at: https://www.oree.com.ua/index.php/web/11563?lang=english [Accessed 05 Mar 2026].

23. Top 10 Facts Every Industrial Leader Must Know About Solar Panel Cost in 2025. (2025). Available at: https://soleosenergy.com/10-facts-solar-panel-cost-industrial-leaders/ [Accessed 05 Mar 2026].

Отримано (Received) 22.04.2026
Отримано після доопрацювання (Received after revision) 30.04.2026
Прийнято (Accepted) 04.05.2026
Опубліковано (Published) 31.05.2026

Analysis of the Role of Local Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems in Peak Load Reduction at Electric Truck Charging Hubs

Oleksandr Besarab [1], *Candidate of Technical Sciences, Professor*
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4170-8294; e-mail: besarab@op.edu.ua;
Scopus Author ID: 57194262142
Vladlen Derevenko [1], *Postgraduate Student*
ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3005-1997; e-mail: vl.de@stud.op.edu.ua
Serhii Horkovskyi [1], *Postgraduate Student*
ORCID: http://orcid.org/0009-0003-6037-9884; e-mail: 4692120@as.op.edu.ua
Andrii Botnar [1], *Postgraduate Student*
ORCID: http://orcid.org/0009-0004-5399-3779; e-mail: 6266441@as.op.edu.ua
[1] *Odesa Polytechnic National University*

Abstract. *This paper investigates the impact of heavy-duty electric vehicle charging hubs on power system operating modes, particularly the formation of peak loads during maximum electricity demand periods. The study analyzes the potential for reducing grid through the integration of local renewable energy sources, primarily photovoltaic systems, and battery energy storage systems. Technical characteristics and limitations of different energy storage technologies for application in electric truck charging infrastructure are examined. Using a logistics distribution center as a case study, the energy balance of a charging hub was modeled, the photovoltaic generation potential was estimated using the PVGIS tool, and the required battery energy storage parameters for daily peak shaving were determined. A techno-economic assessment of the proposed solution was conducted, confirming its energy, economic, and environmental feasibility for implementation in heavy-duty electric vehicle charging hubs.*

Keywords: *charging hub, electric truck, photovoltaic system, battery energy storage system, peak load reduction, renewable energy sources.*

Article citation: Besarab O. M., Derevenko V. Y., Horkovskyi S. V., Botnar A. I. (2026). Analysis of the Role of Local Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems in Peak Load Reduction at Electric Truck Charging Hubs. *Electrotechnic and Computer Systems*, 2026, 46(122), pp.135-146. doi:https://doi.org/10.15276/eltecs.46.122.2026.12

Про авторів (About the authors)

Бесараб Олександр Миколайович, кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп.. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: besarab@op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8567

Oleksandr Besarab, Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of the Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: besarab@opu.ua; ph.: +380 48 705 8567

ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4170-8294; Scopus Author ID: 57194262142

Деревенко Владлен Янович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: vl.de@stud.op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8567

Vladlen Derevenko, Postgraduate student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: vl.de@stud.op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8567

ORCID: http://orcid.org/0009-0005-3005-1997

Горковський Сергій Вікторович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 4692120@as.op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8567

Serhii Horkovskyi, Postgraduate student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: 4692120@as.op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8567

ORCID: http://orcid.org/0009-0003-6037-9884

Ботнар Андрій Іванович, аспірант кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту, Національний університет «Одеська політехніка»; просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна.
E-mail: 6266441@as.op.edu.ua; тел.: +380 48 705 8567

Andrii Botnar, Postgraduate student of the Department of Power Supply and Energy Management, Odesa Polytechnic National University; 1, Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine.
E-mail: 6266441@as.op.edu.ua; ph.: +380 48 705 8567

ORCID: http://orcid.org/0009-0004-5399-3779